

高臨場テレマニピュレーション用カメラアームの開発

田中博貴, 妻木勇一 (弘前大学)

Development of a Camera Arm for Teleoperation with Realistic Sensation

*Hiroki TANAKA, Yuichi TSUMAKI (Hirosaki University)

Abstract— A movable camera is required to improve task performance during teleoperation, because it gives realistic sensation to the operator. Especially, 6-DOF motions enhance such effectiveness. In this paper, a 6-DOF camera arm is introduced to a dual arm teleoperation system. Sufficient work space is assured by both a serial link mechanism and the SC control method. In addition, it is foldable for compact storage. Design concept and details of a prototype will be addressed.

Key Words: Camera arm, Teleoperation, Telexistence, Singularity, SC approach

1 序論

手術用ロボットや危険物を取り扱うロボットなど、高い信頼性と高度な判断が要求されるロボットは、遠隔操作を主体として運用されることが多い。この時、現場の状況を操作者へ提示するためにカメラが使用される。一方、遠隔操作において、効果的な作業を行わせるには、高い臨場感を与えることが重要であると言われている。したがって、視覚情報への依存度が高い人間に高い臨場感を与えるためには、カメラからの情報が重要となる。

遠隔操作に使用されるカメラの形態として、基準座標系に固定されたカメラと可動式のカメラがある。可動式のカメラには、作業するロボットの手先に固定されたものと単独での動きが可能なタイプがある。さらに、単独で動けるカメラは、ジンバル機構により姿勢のみ変えられるものとカメラ専用のマニピュレータを用い並進移動も可能なタイプもある [1]。

高い臨場感を操作者に提示するためには、単独での動きが可能で、姿勢だけではなく、並進運動も実現できるカメラが望ましい。実際、コンピュータグラフィックスを利用したモデルベースシステムにおいて、視点を自由に変更することの重要性が指摘されている [2]。

本論文では、6 自由度の自由度を持つカメラアームを開発し、双腕遠隔操作システムに組み込むことにより、高い臨場感を持つ遠隔操作システムを構築する。開発するカメラアームは、ステレオ視が可能で、使用しないときは折り畳むことが出来る。また、特異点適合法と呼ぶ制御手法を用いることで特異点においても安定な制御を実現し、広い作業領域を実現することができる。

2 設計概念

開発するカメラアームは、三菱重工製の PA-10 マニピュレータを 2 台使用した双腕マニピュレータシステムの遠隔操作を行うための視覚システムとして開発す

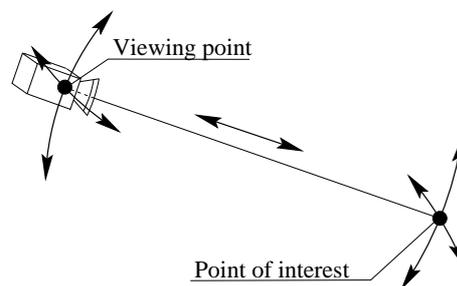


Fig. 1: View point changing system.

る。設計要求を以下に示す。

- (1) 操作者に高い臨場感を提示できること。
- (2) 操作マニピュレータの作業領域を撮像可能なこと。
- (3) 折り畳み可能なこと。
- (4) 小型軽量であること。
- (5) 高い位置決め精度を実現すること。
- (6) 容易な操作インターフェースを実現すること。

効果的な遠隔操作システムを実現するためには、高い臨場感を操作者に提示できることが重要である。(1)の条件はこれを満足させることである。この条件を満たすためには、操作者の頭部の動きをカメラが実現できなくてはならない。このためには、回転運動だけではなく、並進運動も実現する必要がある。一方、操作対象を効率よく観察する方法として、視点と注視点を操作する方法がある [2]。概念図を Fig. 1 に示す。注視点を中心とする球座標で視点を動かすことにより、対象物を様々な角度から眺めることが容易になる。一方、視点を中心とする球座標で注視点を動かすことにより、広い範囲の視覚を得ることが容易となる。ただし、微妙な注視点の操作には、デカルト座標による方法が優れている。実際のカメラに同様の方法を適用するため

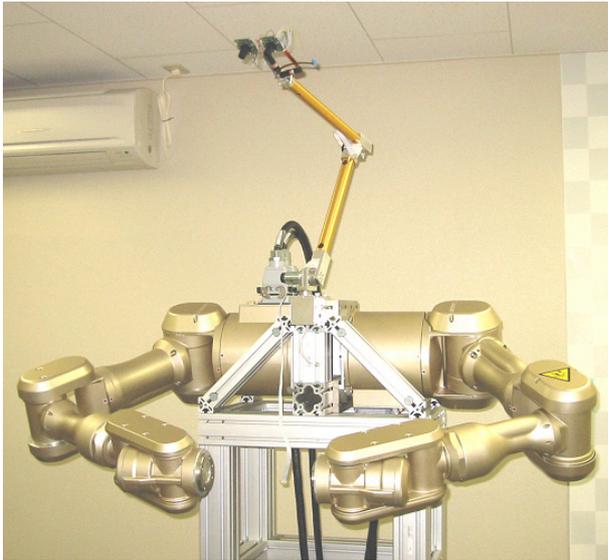


Fig. 2: Overview of the camera arm.

には、カメラに最低 5 自由度の自由度が必要となる。さらに、ステレオ視ができることも高い臨場感を提示するためには必要となる。

(2) の条件から、比較的広い作業領域を持つ PA-10 マニピュレータの作業範囲を考慮してリンクパラメータ及び機構を考える必要がある。(3) の条件は、カメラアームを使用しない時に対する要求である。すなわち、作業の邪魔にならないよう折り畳める事が必要となる。また、カメラアームの電源を切った場合に、ブレーキを使わなくても一定の場所に収まることは機構を簡易にする点でも好ましい。(4) の条件は、小型化により安全性を確保すると同時に取り扱いの良さを確保するためである。(5) の条件は、正確なカメラキャリブレーションを行うために必要である。このことは、遠隔操作時にコンピュータグラフィックスをスーパーインポーズする場合や、画像処理による計測を行う際に重要となる。(6) の条件は、熟練者でなくてもカメラアームを操作できることを目指した条件である。例えば、特異点を気にすることなく操作できれば、操作者にとって使いやすいシステムと言える。

以上のような設計要求を考慮してカメラアームの設計を行った。設計したカメラアームの外観を Fig. 2 に示す。

3 カメラアームの設計

3.1 自由度

前章に示したように、操作者の頭部運動を実現したり、効果的な視点変更を行うためには、姿勢 3 自由度、並進 3 自由度の計 6 自由度が必要である。一方、カメラアームに冗長性を与えることも考えられる。この場合、カメラアームは障害物等を回避することが可能と

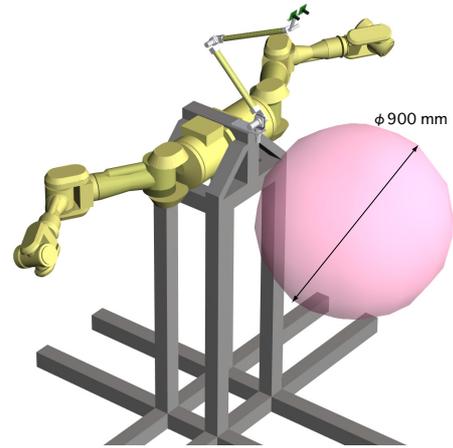


Fig. 3: Required work space of the camera arm.

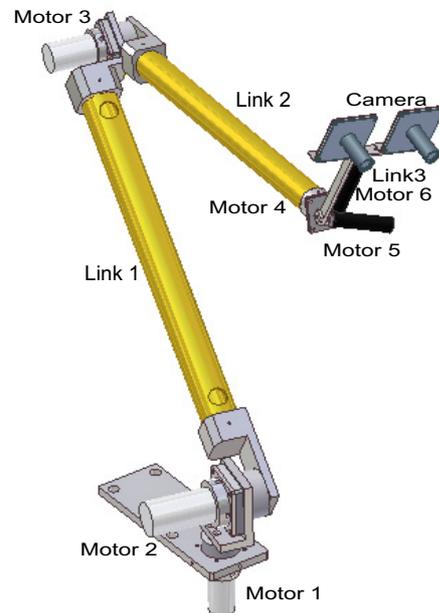


Fig. 4: Details of the camera arm.

なる。特に、双腕マニピュレータの視覚システムとして使用する場合、マニピュレータ同士が干渉することも考えられ、冗長性はこれを解決するために有効な方法と考えられる。しかし、今回対象としている PA-10 は冗長性を持っており、カメラアームとの干渉はマニピュレータ側で回避できる。以上の点を考慮し、カメラアームの自由度を 6 自由度とした。

3.2 機構パラメータの選定

比較的広い作業領域を実現するために、シリアルリンク機構を採用する。アームに搭載するものは小型 CCD カメラだけなので、アームの負担も軽く、シリアル機構はこの点でも適している。また、カメラアームを折り畳んで収納することができるよう肘部の関節を軸方

Table 1: Link parameters.

Link 1	400mm
Link 2	450mm
Link 3	117mm

Table 2: Range of movement.

Joint	Range
1	-180 ° ~ +180 °
2	-125 ° ~ +125 °
3	-180 ° ~ +180 °
4	-180 ° ~ +180 °
5	-150 ° ~ +150 °
6	-180 ° ~ +180 °

向にオフセットすることとした．これにより，カメラアームに電源が入っていない場合でも定位置に収納することが可能となり，ブレーキが不用となる．なお，収納状態でも姿勢部を変更することができ，ジンバル機構と同様の動きが可能である．一方，姿勢部は，運動学が簡単な球状手首を採用することとした．

次に，カメラアームのリンクパラメータを決める．まず，PA-10 の作業範囲を決める必要がある．Fig. 2 に示すように，カメラアームを設置する双腕マニピュレータは，土台が対向するように配置してあり，前部，上部，後部の広い範囲で双腕作業を実施することができる．しかし，人間の作業領域を考えた場合，通常，胸の前で作業をすることが多い．そこで，今回は作業範囲を前部に絞り，直径 900 mm の球を作業領域として仮定した．カメラアームの目標作業範囲を Fig. 3 に示す．これに基づき，決定したリンクパラメータを Table 1 に示す．また，カメラアームの各関節の可動範囲を Table 2 に示す．

一方，小型軽量化のため，リンクにはアルミの中空円筒部材を使用し，並進 3 自由度部には，減速比が大きくバックラッシュのないハーモニックドライブを使用した．これは，並進部のガタがカメラの角度と位置の両方に影響を与えることを考慮した結果である．これに対し，姿勢部 3 自由度には，減速機として遊星歯車を利用した．これは，先端部を軽量化するためである．

実際に設計したカメラアームの詳細を Fig. 4 に示す．なお，4 軸めのモータは中空円筒部材であるリンク 2 の中に収納されている．

4 全体システム

4.1 制御システム

次に制御システムについて述べる．ハードウェアの構成図を Fig. 5 に示す．カメラアームの制御用 PC は，PA-10 とアークネットで繋がっており，カメラアーム

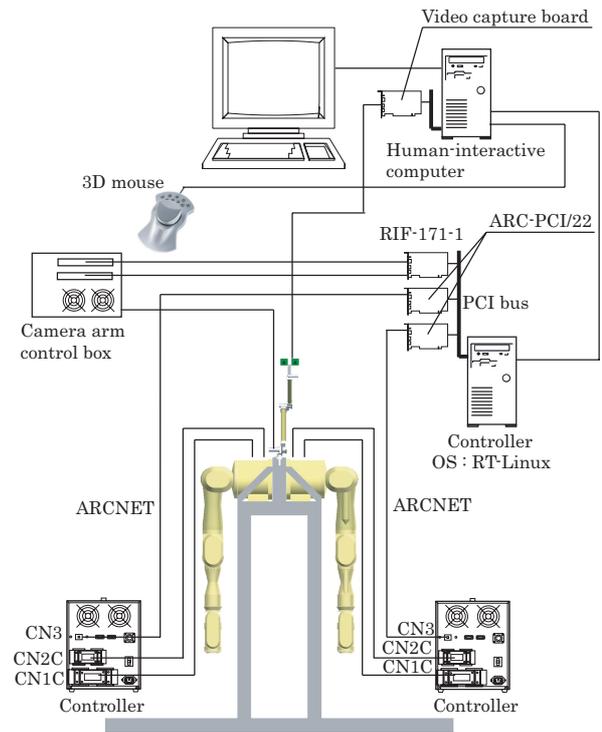


Fig. 5: Hardware architecture.

と PA-10 の両方の制御を行う．このため OS には，RT-Linux を採用している．カメラアームのモータンプには，電子ガバナ回路を内蔵した (有) ライテックス社製 Titech Driver を使用する．また，制御ボードとしてカウンタ機能と D/A 変換機能を備えた Ritech Interface Board を使用している．

4.2 カメラ部

ステレオ視が可能なように 2 台のカメラをアーム先端に取り付けている．カメラには，38 万画素の CIS 社製ボードカメラ DCC-3355N を使用する．NTSC 規格に対応しており，20 g と軽量で十分小型である．このカメラは外部同期に対応しているためステレオ視が可能であり，操作者に臨場感ある映像を提示できる．カメラからの映像信号は操作用 PC のビデオキャプチャボードに取り込むことができる．

4.3 操作インターフェース

入力デバイスとして，3D CONNEXION 社製 3D Mouse Magellan を用いる．3D Mouse は，6 自由度（並進，回転）の入力が可能である．この他にも，ヘッドマウントディスプレイや開発中の能動ディスプレイ [3] を用いた操作システムも検討中である．

5 運動学

Denavit-Hartenberg の記法に基づき，座標系を Fig. 6 のように設定した．この座標系により決まるリン

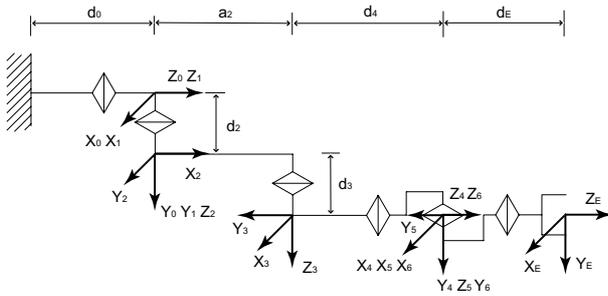


Fig. 6: Coordinate systems of the camera arm.

Table 3: Link parameters of the camera arm.

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
Joint1	0	0°	0	θ_1
Joint2	0	-90°	d_2	θ_2
Joint3	a_2	0°	d_3	θ_3
Joint4	0	90°	d_4	θ_4
Joint5	0	-90°	0	θ_5
Joint6	0	90°	0	θ_6

クパラメータを Table 3 に示す．一般にマニピュレータを制御する際には，機構の特異点が大きな問題になる．特異点近傍では，過大な関節角速度が発生し，制御不能に陥る可能性があり，危険だからである．特に遠隔操作などで操作者がカメラアームをカメラ視点のみを頼りにして制御した場合には，意識せずに特異点に近づく可能性が高い．この問題に対して，従来我々が提案している特異点適合法を採用する [4]．この方法を用いることで操作者は特異点近傍においても過大な関節角速度を生じることなく，マニピュレータの手先速度方向を保ったまま安全に通過することが可能となる．

6 動作シミュレータ

カメラアームの動きを検証するために，コンピュータグラフィックスを用いたシミュレータを構築した．シミュレータは，Linux 上に Open Inventor を使用して製作した．カメラアーム自体の映像を一つのウィンドウに提示し，カメラからの映像を別のウィンドウに提示してある．実際の操作画面を Fig. 7, 8 に示す．カメラアームの操作には，前述の 3D Mouse を使用する．

シミュレータを使って実験したところ，カメラ映像のみの視覚情報に頼った場合，気付かないうちにアームの特異点に近づいてしまうことがあった．このことから特異点適合法をカメラアームに導入することは必要であると考えられる．

7 結論

双腕遠隔操作システムに導入するカメラアームの設計概念およびその詳細を述べた．開発したカメラアーム

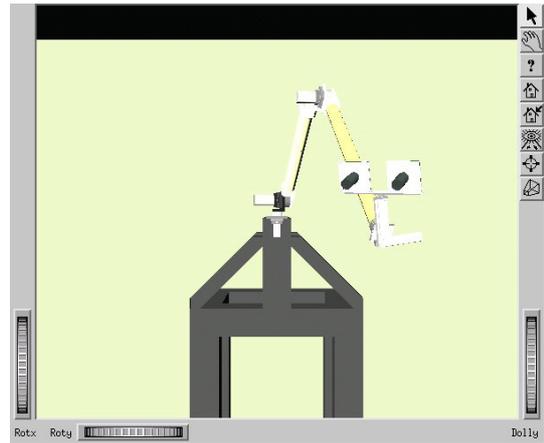


Fig. 7: A scene from a fixed camera.

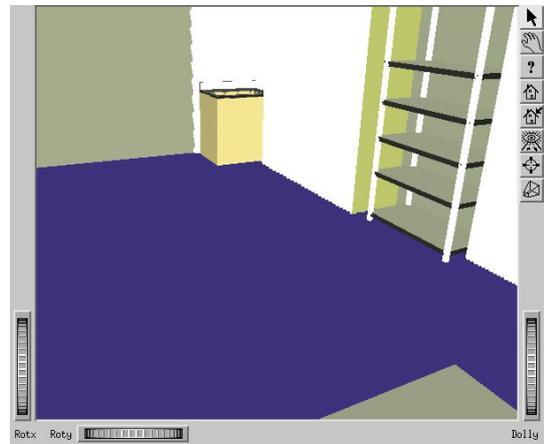


Fig. 8: A scene from a camera on the camera arm.

ムは 6 自由度の自由度を持っており，カメラを動かすことで高い臨場感を操作者に提示することができる．また，特異点の問題がこのようなカメラアームに大きな影響を与えることを指摘し，これを解決するために特異点適合法を導入することを示した．

参考文献

- [1] Craig R. Carignan, David L. Akin, J. Corde Lane, "Dynamic Tool Vector for Robo-Centric Control," Proc. of the 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1188-1193, 2000.
- [2] Y. Tsumaki, M. Kotera, D. N. Nenchev and M. Uchiyama, "Advanced Experiments with a Teleoperation System Based on the SC Approach," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1196-1201, 1998.
- [3] 妻木勇一, 佐藤拓也, 河合聡志, "能動ディスプレイ", 日本バーチャルリアリティ学会第 9 回大会論文集, pp. 443-444, 2004.
- [4] 妻木勇一, 小寺真司, D.N. ネンチェフ, 内山勝, "6 自由度マニピュレータの特異点適合法遠隔操作", 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 195-204, 1998.